

氏 名	桑 原 英 司
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	平成 3 年 3 月 28 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電子工学専攻
学 位 論 文 題 目	金属半導体接合及び超 LSI 用金属配線に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 大見 忠弘
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 大見 忠弘 東北大学教授 小野 昭一 東北大学教授 脇山 徳雄

論 文 内 容 要 旨

如何に複雑に見える超大規模集積回路(超 LSI)も, その構成要素はトランジスタと配線にすぎない。超 LSI の動作速度はトランジスタのスイッチング速度及び配線の信号伝搬速度により律速される。従って, 超 LSI の高性能比にはトランジスタの高速化と同時に配線の高性能化が重要である。また, 4M DRAM に代表される超 LSI 上に形成される金属半導体コンタクトの数は優に 10^6 個を超える。これらの膨大な数のコンタクトの電気的特性を全て一定に揃えるには, 理想的な金属半導体コンタクトを形成する以外にはない。理想的な状態からある一定値だけずれた状態を常に再現する事は殆ど不可能であるからである。このような観点から, 本研究は超高性能 LSI 配線及び金属電極の実現を目指し, 従来, 薄膜形成プロセスでは用いられることのなかった低エネルギーイオン照射を導入し, 高品質金属配線及び金属半導体コンタクトを形成し, 評価を行ったものである。

第 1 章では超 LSI 金属配線及び金属半導体コンタクトの高性能化の意義について述べ, さらに今までになされた研究の概要, 及び本研究の目的について述べている。

第 2 章では, 新しい薄膜形成プロセスとしての低エネルギーイオン照射プロセスの特徴と, 実際に本プロセスを実現した RF-DC 結合バイアススパッタ装置について述べている。

本プロセスの特徴は, 薄膜の堆積と同時にその表面に低エネルギーイオンを照射することにより, 薄膜表面の活性化及び堆積原子の表面マイグレーションの促進をはかる点にある。このとき重要な点は, 照射するイオンのエネルギー及びイオンの数であり, それぞれ薄膜形成プロセスの最適値に正確に制御する事が重要である。薄膜表面を照射するイオンのエネルギーは数 eV~数10eV であり, 薄膜を構成する原子の結合エネルギーとはほぼ同程度の値である。従って照射するイオンと薄膜原子

との相互作用が効率よく起こることが期待される。イオンのエネルギーが大きすぎれば、薄膜はスパッタあるいはイオン注入効果により照射損傷を生じる。また、照射するイオンの数が堆積する原子に比べ少なければ表面の活性化は十分に起こらない。低エネルギーイオン照射プロセスは RF 放電と DC バイアスを組み合わせた RF-DC 結合バイアスパッタ装置により実現された。本装置の最も大きな特徴は、照射するイオンのエネルギー及び数を外部より電氣的に精密制御可能としている点である。即ち、ウェハに接続した DC 電源によりイオンの照射エネルギーを、また、ターゲットに接続した RF 電源によりイオンの量をそれぞれ独立に制御している。更に、ターゲットの DC 電源により成膜速度も制御可能となっている。また、本装置は超高純度ガス供給系及び超高真空排气系を有し、徹底した系のクリーン化が施されている。本装置による放電特性の各種パラメータ（放電周波数、放電ガス圧、磁場強度）依存性及びアルミニウム薄膜の成膜結果は装置設計の最適化の指針を与えている。

第3章では、低エネルギーイオン照射によるアルミニウム薄膜の物性制御について述べている。

最初にアルゴンガス中の水分濃度とアルミニウム薄膜の表面平坦性との関係が示され、高品質アルミニウム薄膜の形成にはアルゴンガス中の水分濃度は10ppb以下に抑える必要がある事を明らかにしている。続いてイオンの照射条件を変えて成膜を行い、イオン照射の表面平坦性、結晶性、及びアルゴン吸蔵量に与える影響の評価を行っている。その結果、いずれの場合もイオンの照射エネルギーには最適値が存在し、約50eVの照射エネルギーで成膜を行ったアルミニウム薄膜は、最も優れた表面平坦性及び結晶性を示し、またこの時のイオン照射条件でアルゴン吸蔵量は極小値を示す事を明らかにしている。更に、(100) Si 及び (111) Si 上にアルミニウムの成膜を行い、(100) Si 上のアルミニウム薄膜より、(111) Si 上のアルミニウム薄膜の方が結晶性が優れており、また、より低いエネルギーのイオン照射で結晶性の向上が起こる事を示している。これはアルミニウムの配向性と下地基板の面方位が一致したためと考えられる。なお、本研究で形成されたアルミニウム薄膜は常に完全な(111)配向を示している。

第4章では、超 LSI 用金属配線に要求される種々の条件について述べ、純アルミニウム超 LSI 配線が有利である事をまとめている。さらに、実際に低エネルギーイオン照射プロセスにより形成された純アルミニウム薄膜の超 LSI 金属配線としての応用を試み、比抵抗、ステップカバレッジ、エレクトロマイグレーション、及び照射損傷について評価を行っている。

超 LSI 用金属配線は第1に低抵抗である必要がある。アルミニウムは抵抗率が小さいこと、さらに純金属を用い、動作温度を液体窒素温度とすることにより金属配線の電気抵抗を約1/10まで低減できる事を示している。また、超 LSI では素子のレイアウトの要請から多層配線の採用が必須となる。この時問題となるのがヒロックによる層間絶縁膜の短絡であり、また、コンタクトホール及びスルーホールにおけるステップカバレッジの良否である。従来技術により形成された Al-Si 合金薄膜は350°Cの熱処理において、非常に多数のヒロックが発生しているのに対し、低エネルギーイオン照射プロセスにより形成された純 Al 薄膜は500°Cまでヒロックの発生は全く起こっていない。550°Cの熱処理でヒロックの発生が観察されるが、その密度は非常に小さい。このとき重要な点は成膜直前の表面クリーニングであり、本研究では2~3eVのエネルギーのイオン照射により吸着

不純物の除去を行っている。さらにヒロックが発生しない条件で成膜を行ったアルミニウム薄膜は、コンタクトホールにおいて良好なスナップカバレッジを示している。積極的なイオン照射を行わないで成膜を行ったサンプル（基板バイアス：0V）はシャドウイング効果によりコンタクトホールが十分穴埋めされていない。一方、基板バイアス：-20Vで成膜を行ったサンプルは非常に緩やかなテーパを残してコンタクトホールが穴埋めされている。0Vと-20Vで膜厚に差がないことから、コンタクトホールの穴埋めは再スパッタの効果ではないことを明らかにしている。非常に低いエネルギーのイオンでも、十分な量を照射する事により高い熱安定性と良好なステップカバレッジを同時に実現している。また、低エネルギーイオン照射プロセスにより形成されたアルミニウム薄膜は、蒸着法により形成されたアルミニウム薄膜に比べ非常に大きなエレクトロマイグレーション耐性を示している。さらに低エネルギーイオン照射によるMOSFETのしきい値変化もほとんどないことから照射損傷は発生していない。これらの結果から低エネルギーイオン照射プロセスにより形成された純アルミニウム薄膜は超LSI用配線材料として非常に優れていることを示している。

第5章では、アルミニウム、銅、チタンを電極材料としてn型Si及びp型Siに対し、それぞれショットキーコンタクト及びオーミックコンタクトを形成し電流電圧特性の評価を行っている。

超LSIの高速動作にはコンタクト抵抗を含む配線抵抗の低減が重要である。低抵抗コンタクトの実現において問題となるのが、金属/シリコン界面に存在する自然酸化膜である。また自然酸化膜の存在は理想的な金属/シリコン界面を形成する上で大きな妨げとなる。自然酸化膜の形成を抑制するにはシリコン表面を大気に曝さなければよい。本研究ではウェハプロセスをクリーン窒素雰囲気で行う事により、自然酸化膜の形成を抑制している。さらに金属電極の成膜直前に低エネルギーイオン照射によりシリコン表面の吸着不純物の除去を行っている。本研究を通して得られたAl/n-Siショットキーコンタクトは300°Cの熱処理を行ってもショットキー障壁高さの変化がないこと、またAl/p-Siショットキーコンタクトは室温ではオーミック特性を示すが液体窒素温度では整流特性が現れることを示し、Al/p-Siショットキーコンタクトはショットキー障壁高さがAl/n-Siに比べ非常に小さいことを明らかにしている。さらにCu/n-Si、及びCu/p-Siショットキーコンタクトは熱電子放出理論と非常によく一致した電流電圧特性を示し、n型Si及びp型Siに対するショットキー障壁高さの和がシリコンのバンドギャップとほぼ等しくなることを示している。Ti/n-Si、及びTi/p-Siショットキーコンタクトについても同じ評価を行っている。またショットキー障壁高さのシリコン基板の面方位による変化についても評価を行っている。さらにこれらのショットキーコンタクトの逆方向ブレイクダウン特性及び耐圧分布も示している。オーミックコンタクトに関しては、コンタクト抵抗のシリコンウェハの洗浄雰囲気依存性、及びショットキー障壁高さ依存性について評価を行っている。Al/n⁺-Siコンタクトにおいて、大気中で最終洗浄、乾燥、及び搬送を行ったサンプルは大きなコンタクト抵抗とデータのばらつきを示したのに対し、クリーン窒素中で最終洗浄、乾燥、及び搬送を行ったサンプルは一切の熱処理無しで $3.8 \times 10^{-1} \Omega \cdot \text{cm}^2$ の低いコンタクト抵抗を示し、またデータのばらつきも小さい。ショットキー障壁高さ依存性に関しては、n型Siに対してはチタン、銅、アルミニウムの順にショットキー障壁高さが大きくなり、p型Siに対してはこの逆の順になる。金属/p⁺-Siコンタクトにおいては、コンタクト抵抗へのショット

キー障壁高さの指数関数的な依存性がはっきりと現れているが、金属/ n^+ -Si コンタクトにおいてはあまりはっきりと現れていない。これは不純物のドーピング濃度の差、及び本研究におけるコンタクト抵抗の測定方法の測定限界によるものと思われる。

第6章は結論であり、第2章から第5章までを通して得られた結果を要約している。

本研究では、従来、薄膜形成プロセスで用いられることのなかったイオンの運動エネルギーを積極的にプロセスに取り入れることにより、薄膜の物性制御及び成膜直前の表面の吸着不純物除去を行っている。その結果、優れた結晶性、高い熱安定性及びエレクトロマイグレーション耐性、良好なステップカバレッジを示す Al 薄膜が得られている。また、シリコン表面の自然酸化膜形成を抑制することにより理論と一致した電気特性を示すショットキーコンタクト、及び低抵抗オーミックコンタクトが得られている。従って、本研究は超 LSI の高性能化において大きな意義をもつものである。

審査結果の要旨

最小線幅が、サブミクロン領域に微細化された超 LSI の高性能化及び高信頼化のためには、理想的な金属半導体接合と低抵抗で信頼性の高い金属配線が要求される。従来の成膜技術による Al 配線は、エレクトロマイグレーションによる断線不良や熱処理時のヒロック発生に伴う短絡不良の発生といった重大な欠点を内蔵しており、 $0.5\mu\text{m}$ 以降の超 LSI には使用不可能と言われていた。一方、従来プロセスではソース、ドレイン、エミッタ等の n^+ 領域表面に自然酸化膜が形成され、金属半導体接合の接触抵抗を高め、かつその面内不均一が大きくなって、デバイス特性の劣化及び信頼性低下の原因になっていた。

本論文は、エレクトロマイグレーション耐性に優れ、ヒロック発生を 500°C の熱処理でも完全に抑制することができ、かつショットキ障壁高さの面内不均一が 0.05% 以内と極めて小さいほぼ理想的な金属半導体接合を可能にする、新しい金属成膜技術を実現した成果をまとめたもので、全文 6 章よりなる。

第 1 章は序論であり、本研究の背景と目的を述べている。

第 2 章では、本研究で開発した、金属薄膜成膜時に薄膜表面に照射する Ar イオンのエネルギーと密度及び成膜速度を独立に制御可能な RF-DC 結合バイアスパッタ装置について述べている。

第 3 章では、前章で記述した成膜装置を用いて形成した Al 薄膜の結晶性の照射 Ar イオンエネルギー依存性について述べ、 $50\sim 60\text{eV}$ 程度のエネルギーの Ar イオン照射を行いながら形成した Al が最も良好な結晶性を示し、Ar 吸蔵量も最小になることを明らかにしている。

第 4 章では、前章で明らかにされた最適条件で形成された Al 薄膜は、 500°C の熱処理でもヒロックが発生せず、抵抗率はバルクの Al と等しい $2.75\mu\Omega\cdot\text{cm}$ と低く、エレクトロマイグレーション耐性も従来の Al 薄膜に比べ 2 桁程度改善されることから、将来の超 LSI にも十分適用可能なことを明らかにしている。これは、重要な知見である。

第 5 章では、自然酸化膜の存在しない Si 表面との金属接合を実現するため、 N_2 ガスシール洗浄・搬送方式を導入することにより、熱処理無しで $0.3\mu\Omega\cdot\text{cm}^2$ 以下の小さな接触抵抗が実現できることを明らかにしている。

第 6 章は結論である。

以上要するに本論文は、所定のエネルギーと密度に制御された Ar イオンを照射しながら成膜する新しい成膜装置を開発することにより、低抵抗でヒロック発生が無くエレクトロマイグレーション耐性にも優れた超 LSI 配線と、ほぼ理想的な金属半導体接合とを実現しえた研究の成果をまとめたもので、半導体電子工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。